



Surface Integrity and Tool Wear in Milling Process Using Minimum Quantity Lubrication and Dry Techniques on 304L Steel

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Tajoddin A.¹,
Ranjbar A.H.¹,
Jabbaripour B.^{1*}

How to cite this article

Tajoddin A, Ranjbar A H, Jabbaripour B, Surface Integrity and Tool Wear in Milling Process Using Minimum Quantity Lubrication and Dry Techniques on 304L Steel. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(03):131-140.

¹ Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

beh.jabbaripour@iauctb.ac.ir

Article History

Received: January 30, 2024
Accepted: June 9, 2024
ePublished: June 22, 2024

ABSTRACT

This research investigates tool wear, elemental analysis (EDAX) on the machined surface, surface roughness, microhardness and microstructural changes in the cross-section of milled 304L stainless steel samples under dry and Minimum quantity lubrication (MQL) methods. The MQL process was able to improve the surface roughness for all milling parameters from 17% to 41% compared to the corresponding dry conditions. In dry machining, defects such as built up edge, severe flank wear and tool chipping were created. In MQL mode, these defects were significantly reduced and tool chipping was almost eliminated. By increase of cutting speed and depth, the surface hardness has increased. Compared to the dry method, the MQL reduces the hardness values and hardened depth below the machined surface. According to EDAX analysis on dry and MQL machined surfaces, applying the roughest cutting parameters, it was determined that no change of chemical elements occurred on machined surfaces. Increasing cutting parameters or dry machining causes the plastic deformation to intensify, the microstructure is flattened and the microstructure grains are compressed in the vicinity of the machined surface. The maximum reduction in thickness of deformed layer in MQL compared to dry method is 39%. For each milling sample, there is a direct relationship between the hardened depth and thickness of the corresponding microstructurally deformed layer.

Keywords Stainless steel, Milling, Minimum Quantity Lubrication, Surface integrity, Tool wear.

CITATION LINKS

1- Stainless and heat resistance steels. 2- Hard AlTiN, AlCrN PVD coatings for machining of austenitic stainless steel. 3- A study on droplets sizes, their distribution and heat exchange for 4- Investigating surface roughness, material removal rate and corrosion resistance in PMEDM of 5- Investigating Output Characteristics in Powder Mixed Electrical Discharge Machining of 6- Experimental study of tool wear and surface roughness on 7- Investigating the effects of powder mixed electrical discharge machining on 8- Manufacture and comparison of mechanical properties of reinforced polypropylene nanocomposite with 9- Observation of built-up edge formation on a carbide cutting tool with 10- Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and 11- Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on surface roughness of mild steel of 15HRC on 12- Cryogenic and minimum quantity lubrication for 13- State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys. 14- Surface morphology and affected layer in disc-milling grooving of titanium alloy. 15- Influence of nano-minimum quantity lubrication with MoS₂ and CuO nanoparticles on cutting forces and 16- Study of the performance of minimum quantity lubrication (MQL) and type of lubricant in 17- High speed milling of Ti6Al4V alloy with minimal quantity lubrication. 18- Influence of CVD and PVD coating micro topography on the initial material transfer of 316L stainless steel in 19- Built-up edge formation in stainless steel milling. 20- Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. 21- Comparison in surface integrity and fatigue performance for hardened steel ball-end milled with 22- The effect of cutting speed and feed rate on the surface integrity in dry turning of CoCrMo alloy. 23- Machining titanium and its alloys. 24- Comparison of surface integrity, tool wear and chip morphology in CO₂ cryogenic and dry milling of 25- Comparison of Machined Surface Integrity in 304L Stainless Steel Turning under Minimum

یکپارچگی سطح قطعه‌کار و سایش ابزار در فرآیند فرزکاری با تکنیکهای مقدار روانکاری کمینه و خشک روی فولاد 304L

آریا تاج‌الدین^۱، امیرحسین رنجبر^۱، بهزاد جباری‌پور^{*}

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

چکیده

این تحقیق به بررسی سایش ابزار، آنالیز عنصری روی سطح ماشینکاری، زبری سطح قطعه‌کار، تغییرات ریزسختی و تغییرات ریزساختاری در سطح مقطع عرضی نمونه‌های فرزکاری شده فولاد ضدزنگ 304L تحت روشهای خشک و روانکاری کمینه (MQL) می‌پردازد. فرآیند MQL توانسته است زبری سطح ماشینکاری را برای تمام پارامترهای فرزکاری، از ۱۷٪ تا ۴۱٪ نسبت به حالات متناظر ماشینکاری خشک، بهبود بخشد. در ماشینکاری خشک، عیوبی نظیر لبه انباشته، سایش شدید سطح آزاد و لب‌پر شدگی ابزار ایجاد شدند. در فرزکاری MQL این عیوب کاهش چشمگیری داشتند و لب‌پر شدگی روی سطح ابزار تقریباً حذف شده است. با افزایش سرعت برشی و عمق برشی، سختی سطحی افزایش یافته است. روش MQL نسبت به خشک، باعث کمتر شدن مقادیر سختی و عمق سخت‌شده زیر سطح ماشینکاری می‌شود. بر اساس نتایج آنالیز عنصری EDAX روی سطوح ماشینکاری شده خشک و MQL، تحت خشن‌ترین پارامترهای برشی مشخص شد که هیچگونه تغییر عناصر شیمیایی در سطح ماشینکاری رخ نداده است. افزایش پارامترهای برشی و یا ماشینکاری خشک، سبب تشدید تغییر شکل پلاستیک، لهیده شدن ریزساختار و فشرده شدن دانه‌های ریزساختاری در مجاورت سطح ماشینکاری می‌شود. حداکثر مقدار کاهش ضخامت لایه تغییر شکل یافته در فرزکاری MQL نسبت به خشک ۳۹٪ است. برای هر نمونه فرزکاری، بین عمق سخت شده و ضخامت لایه تغییر شکل یافته ریزساختاری متناظرش، یک رابطه مستقیم وجود دارد.

کلیدواژه‌ها: کلمات، فولاد ضدزنگ، فرزکاری، مقدار روانکاری کمینه، یکپارچگی سطح، سایش ابزار.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰

* نویسنده مسئول: beh.jabbaripour@iauctb.ac.ir

۱- مقدمه

معروفترین خانواده فولاد ضدزنگ، فولادهای سری ۳۰۰ هستند که پرمصرف‌ترین گرید از این خانواده، فولاد ضدزنگ آستنیتی ۳۰۴ می‌باشد که تقریباً شامل ۱۸ درصد کروم و ۸ درصد نیکل است [1]. استحکام بالای فولاد ضدزنگ سبب افزایش تنشهای مکانیکی به ابزار برشی در حین فرآیندهای مختلف ماشینکاری می‌شود و از طرفی هدایت حرارتی پایین سبب افزایش دما در موضع برش است و حرارت نمی‌تواند به طور مطلوب دفع شود. فولادهای ضدزنگ آستنیتی حتی در نرخ پایین تغییر شکل و هدایت حرارتی، کارسختی (Work Hardening) بالایی دارند، این ویژگیها باعث می‌شود تا فولادهای ضدزنگ نسبت به فولادهای کربنی، فولادهای

آلیاژی کم کربن و فولادهای ضدزنگ غیرآستنیتی، سخت‌تر ماشینکاری شود [2].

تکنیک میزان روانکاری کمینه (Minimum Quantity Lubrication (MQL)) تکنیکی نسبتاً مدرن است که در آن از حداقل میزان سیال روانکار جهت کاهش اصطکاک در فصل مشترک ابزار و قطعه‌کار در حین فرآیندهای ماشینکاری استفاده می‌شود. مصرف متداول روانکار در این تکنیک معمولاً بین ۵۰ تا ۱۵۰ میلی‌لیتر بر ساعت می‌باشد. در این روش با استفاده از یک نازل، جت هوای تحت فشار که حاوی ذرات ریز روغن است، مستقیماً به موضع تماس ابزار-قطعه‌کار برخورد کرده و علاوه بر خنک کردن قطعه‌کار و ابزار، باعث روانکاری سطح و کاهش اصطکاک نیز می‌شود. سیال برشی اغلب از نوع روغن گیاهی می‌باشد [3].

یکپارچگی سطح (Surface Integrity) مفهومی است که علاوه بر بیان خواص هندسی، به معرفی خواص مکانیکی، متالورژیکی، فیزیکی و شیمیایی نیز می‌پردازد. اصطلاح یکپارچگی سطح در ماشینکاری، وضعیت و خواص سطح ماشینکاری شده و رابطه آن با کارکرد قطعه را توصیف می‌کند. به طور کلی یکپارچگی سطح در قالب وضعیت توپوگرافی، خواص مکانیکی، شیمیایی و متالورژیکی سطح ماشینکاری شده و رابطه آن با عملکرد قطعه توصیف می‌شود. ویژگی‌های عملکردی که به یکپارچگی سطح بستگی دارد، شامل استحکام خستگی، استحکام شکست، نرخ خوردگی و خواص تریبولوژیکی مثل اصطکاک و سایش است [4-8].

ازلان و همکاران [9] در ماشینکاری آلومینیوم به این نتیجه رسیدند که هنگام فرزکاری MQL نسبت به روش خشک، ایراد لبه انباشته روی ابزار به وجود نیامده است که دلیل آن نیز کم شدن اصطکاک میان ابزار و قطعه‌کار به دلیل وجود روان‌کار و همچنین کمتر شدن حرارت ناشی از ماشینکاری به دلیل پاشش آئروسول روغن با فشار به سمت موضع ماشین‌کاری است. ژانگ و همکاران [10] در فرزکاری آلیاژ Inonel 718 به این نتیجه رسیدند که میزان شکستگی و سایش در حالت خشک بسیار بیشتر از حالت روانکار کمینه است. این پدیده به دلیل اصطکاک کمتر در موضع تماس ابزار-براده-قطعه‌کار است که به دلیل روانکاری بهتر در حالت روانکار کمینه اتفاق می‌افتد. کدیرا و همکاران [11] در فرزکاری فولاد کربن متوسط به این نتیجه رسیدند که در آزمایش‌های انجام شده با تکنیک روان‌کاری کمینه، با افزایش سرعت برشی، زبری سطح افزایش می‌یابد. آنها مشاهده کردند که افزایش سرعت برشی هم در حالت سیلابی و هم در حالت روانکاری کمینه، باعث افزایش زبری سطح می‌شود. پیرا و همکاران [12] در هنگام تراشکاری فولاد ضدزنگ 304 به این نتیجه رسیدند که بیشتر بودن سختی در عمقهای مختلف در حالت خشک نسبت به حالت مقدار روانکار کمینه می‌تواند به دلیل سایش بیشتر ابزار در حالت خشک و در نتیجه کارسختی بیشتر روی سطح ماشینکاری در حالت خشک

۲- مواد، تجهیزات و طراحی آزمایش‌ها

در این تحقیق جهت فرزکاری از ماشین فرز CNC سه محوره CINCINNATI با کنترلر SIEMENS استفاده شد. این دستگاه دارای حداکثر سرعت اسپیندل ۶۰۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد. اینسرت‌های ابزار از نوع ISCAR-IC928-100304PDR-HM90 APKT تولید شرکت بودند. نوع پوشش‌دهی اینسرت‌ها PVD و جنس پوشش TiAlN می‌باشد. برای هر تست ماشینکاری، یک لبه جدید اینسرت ابزار استفاده شده است. هولدر ابزار SMOXH با مدل ST90-AP10 مورد استفاده قرار گرفت. این هولدر تک اینسرت (تک‌لبه) بوده و دارای قطر ۱۲ میلیمتر و طول ۱۲۰ میلیمتر می‌باشد. برای انجام آزمایش‌ها بلوک خام فولاد ضدزنگ ۳۰۴ به ابعاد ۳۵ × ۱۴۰ × ۳۱۰ میلیمتر تهیه و سپس عملیات دورتراشی و گونیا کردن روی وجوه آن انجام شد.

در تحقیق جاری دستگاه ریزسختی‌سنج مورد استفاده از برند Buehler و مدل Micromet 1 بوده است. در سختی‌سنجی میزان نیروی بارگذاری روی ۳۰۰ گرم نیرو و زمان روی ۱۰ ثانیه تنظیم شد. برای اندازه‌گیری زبری سطح از دستگاه زبری-سنجی Taylor-Hobson استفاده شده است که دارای رزولوشن ۰/۰۲ میکرومتر می‌باشد. از میکروسکوپ نوری Olympus BX51M برای بررسی سایش ابزار استفاده شد. برای بررسی ریزساختار از میکروسکوپ نوری OLYMPUS PME3 استفاده شد. در این پژوهش از میکروسکوپ SEM با مدل FEI Quanta 450 برای آنالیز عنصری EDAX روی سطوح ماشینکاری استفاده شد.

در تحقیق جاری مطابق جدول ۱، دور اسپیندل و عمق برش محوری هر کدام در سه سطح تغییر می‌کنند و با توجه به دو حالت ماشینکاری خشک و روانکاری کمینه، در مجموع تعداد ۱۸ تست ماشینکاری، طراحی و اجرا شده است. نوع تست‌های فرزکاری، شیارتراشی یکطرفه بوده است و تعداد پاس‌های متوالی شیارتراشی در هر تست طراحی شده برابر با ۴ پاس بوده است.

شماتیک مدار MQL طراحی و ساخته شده در تحقیق جاری، در شکل ۱ قابل مشاهده می‌باشد. قبل از انجام تست‌های فرزکاری MQL، ابتدا با انجام تعداد زیادی پیش‌تست، تنظیمات مختلف و متنوع بر روی این مدار آزمایش شدند و در نهایت پارامترهای بهینه مدار مطابق جدول ۲، تعیین، تنظیم و استفاده شدند.

جدول ۱) پارامترهای برشی مورد استفاده در تست‌های ماشینکاری

دور اسپیندل (دور بر دقیقه)	۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۴۰۰۰
سرعت پیشروی به ازای هر دندانه (میلیمتر بر دندانه)	۰/۱۵ (ثابت)
عمق برش محوری در هر پاس (میلیمتر)	۱، ۱/۵، ۲

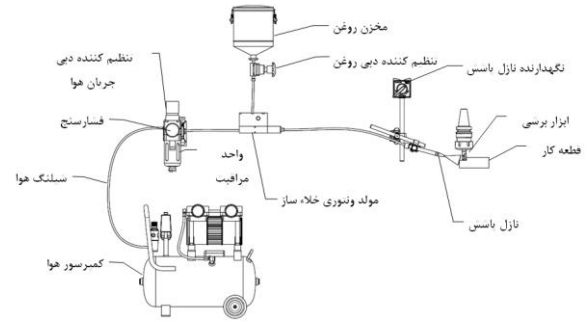
باشد. تاکور و همکاران^[13] و همچنین هونگمین و همکاران^[14] در فرآیند فرزکاری MQL آلیاژهای نیکل و تیتانیوم به این نتیجه رسیدند که اگر از سطح به سمت عمق قطعه ماشینکاری شده، سختی‌سنجی انجام شود، مقادیر سختی کاهش می‌یابند و دلیل سختی بیشتر در سطح نیز بارهای حرارتی و مکانیکی هستند که باعث افزایش کارسختی روی سطح هستند. کارسختی صورت گرفته روی سطح ماشینکاری باعث تغییرات دانه‌بندی ریزساختاری در لایه‌های زیرین می‌شود. اعظمی و همکاران^[15] در تحقیقی، فرآیند سنگ‌زنی فولاد AISI D₂ به روش MQL با افزودن نانوذرات MoS₂ و CuO به دو نوع روغن گیاهی کلزا و سویا با غلظت‌های مختلف و تأثیر آنها بر نیروهای برشی و زبری سطح را بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که مقادیر نیروی نرمال و نیروهای مماسی با استفاده از پودر نانو اکسید مس در روغن پایه سویا با غلظت ۴ درصد و نانو پودر MoS₂ در روغن پایه سویا با غلظت ۲ درصد به ترتیب ۱۹ و ۳۵ درصد کاهش یافت. همچنین هنگام استفاده از نانو پودر CuO در روغن پایه کلزا و با غلظت ۲ درصد، زبری سطح در مقایسه با روغن خالص به عنوان سیال برشی، ۷۷ درصد کاهش داشت.

امامی^[16] در پژوهشی اثر روانکاری کمینه و نوع روانکار در فرآیند فرزکاری فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی EN 1.4903 را بررسی نمود. برای این منظور از یک نوع روغن گیاهی دانه کنجد در دو حالت بدون افزودنی و با افزودنی آنتی‌اکسیدان و یک نوع روغن معدنی برش استفاده شد و نیروهای فرزکاری، زبری سطح و بافت سطح ماشینکاری، بررسی شد. همچنین آزمایشها در دو شرایط ماشینکاری خشک و تر نیز انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش روانکاری کمینه در مقایسه با روشهای متداول، با کاهش نیروها و بهبود کیفیت سطح، قابلیت ماشینکاری فولاد زنگ‌نزن را ارتقاء می‌بخشد. همچنین نوع روغن مصرفی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر خروجی‌های فرآیند دارد.

تاکنون تحقیقات محدودی در زمینه فرزکاری با تکنیک میزان روانکاری کمینه، بر روی فولاد ضدزنگ 304L گزارش شده است. از دیگر جنبه‌های قابل توجه در تحقیق جاری، بررسی جامع شاخصهای متنوع یکپارچگی سطح فولاد ضدزنگ آستنیتی 304L تحت فرآیندهای فرزکاری خشک و MQL و مقایسه آنها با یکدیگر است و به ندرت با این گستردگی معیارهای یکپارچگی سطح در فرزکاری MQL فولاد ضدزنگ 304L، توسط سایر محققان گزارش شده است. در این مطالعه تجربی به بررسی سایش سطوح براده و آزاد ابزار برشی، آنالیز عنصری (EDAX) روی سطح ماشینکاری، زبری سطح قطعه کار، تغییرات ریزسختی و همچنین تغییرات ریزساختاری در سطح مقطع عرضی نمونه‌های فرزکاری شده فولاد ضدزنگ 304L تحت روشهای خشک و MQL پرداخته می‌شود. در تحقیق جاری برای ماشینکاری MQL، یک نوع مدار مخصوص روانکاری، طراحی، ساخته و استفاده شده است.

جدول ۲) تنظیمات و حالات بهینه مدار روانکاری کمینه

حالت بهینه	جدول ۲: تنظیمات و حالات بهینه مدار روانکاری کمینه مشخصه
پسرو (پشت ابزار)	نحوه قرارگیری نازل
۸۰ میلی‌لیتر بر ساعت	دبی پاشش روغن
۵/۴ بار	فشار باد کمپرسور
۲۰ درجه	زاویه نازل پاشش نسبت به سطح قطعه‌کار
روغن برشکاری حفظان CU637	نوع روغن
۳۰ میلیمتر	فاصله نازل تا سر ابزار



شکل ۱) شماتیک مدار روانکاری کمینه مورد استفاده در تستهای فرزکاری

۳- نتایج و بحث

۳-۱- زبری سطح ماشینکاری شده

برای هر تست ماشینکاری، زبری سنجی سه مرتبه در جهت طولی هر شیار فرزکاری شده انجام گرفت و نهایتاً مقدار میانگین زبری حاصل از این سه مرتبه اندازه‌گیری، به عنوان زبری متوسط (Ra) برای هر آزمایش ماشینکاری، گزارش شده است. طول اندازه‌گیری دستگاه زبری‌سنج، برای هر مرتبه زبری‌سنجی روی سطح شیارها برابر با ۴ میلیمتر بوده است.

با توجه به ثابت بودن قطر ابزار، سرعت برشی و سرعت اسپیندل رابطه مستقیم با یکدیگر دارند. لذا دورهای اسپیندل ۲۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ دور در دقیقه به ترتیب معادل سرعتهای برشی ۷۵، ۱۱۳ و ۱۵۱ متر بر دقیقه هستند. با بررسی نمودار شکل ۲، به وضوح می‌توان تاثیر استفاده از تکنیک روانکاری کمینه در کاهش زبری سطوح فرزکاری نسبت به حالت خشک را مشاهده کرد. در این شکل در بالای نمودارهای ستونی مربوط به هر تست ماشینکاری، درصد بهبود زبری سطح تحت شرایط فرزکاری MQL نسبت به حالت متناظر خشک درج شده است.

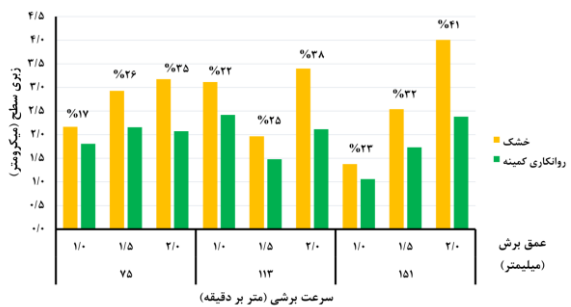
در تستهای سری اول (سرعت برشی ۷۵ متر بر دقیقه و عمق برش ۱ میلیمتر) زبری سطح در حالت MQL کمتر از حالت خشک است و دلیل آن نیز حضور روانکار در موضع ماشینکاری و کم کردن اصطکاک و در نتیجه کاهش ساییش لبه برنده ابزار است. استفاده از روانکاری کمینه باعث ۱۷٪ بهبود در زبری سطح شده است. در حالت MQL، جت هوای حامل قطرات بسیار ریز روغن، خود تا حدی نقش خنک‌کاری و ذرات اتمیزه شده روغن نقش روانکاری دارند. باید توجه داشت که روانکاری در تکنیک روانکاری کمینه تاثیر بسیار بیشتری نسبت به خنک‌کاری در این فرایند دارد زیرا قطرات روغن نقش خنک‌کاری خاص و ملموسی ندارند و عمدتاً روانکار و کاهش دهنده اصطکاک و نیروی تماسی در موضع برشی بین اینسرت ابزار و قطعه کار هستند [17].

در تستهای سری دوم (سرعت برشی ۷۵ متر بر دقیقه و عمق برش ۱/۵ میلیمتر) دلیل افزایش زبری سطح با افزایش عمق برش احتمالاً می‌تواند به دلیل افزایش ساییش نوک ابزار باشد. به دلیل افزایش عمق برش، میزان درگیری نوک ابزار و قطعه‌کار در موضع

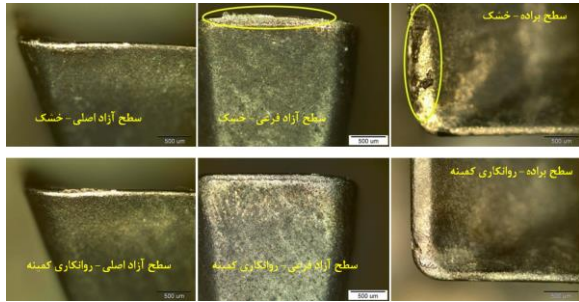
برش بیشتر می‌شود و در نتیجه سطح ابزار دچار ساییش بیشتری می‌شود که می‌تواند باعث ایجاد سطح زبرتر شود. در این مقایسه استفاده از تکنیک روانکار کمینه باعث ۲۶٪ بهبود در زبری سطح قطعه‌کار شده است.

در تستهای سری سوم (سرعت برشی ۷۵ متر بر دقیقه و عمق برش ۲ میلیمتر) افزایش زبری در حالت خشک می‌تواند به همان دلایلی باشد که برای تستهای سری دوم ذکر شد. همانطور که در شکل ۲ مشخص است استفاده از MQL باعث ۳۵٪ بهبود در زبری سطح شده است که درصد بهبود بیشتری نسبت به تستهای سری قبلی است. پس عمدتاً با خشن‌تر شدن عملیات ماشینکاری یعنی افزایش پارامترهای برشی (افزایش سرعت و عمق برشی) که از عوامل موثر در افزایش نیروی ماشینکاری، دما و اصطکاک در موضع برش و نرخ ساییش ابزار هستند، راندمان تکنیک روانکاری کمینه نیز بیشتر شده است.

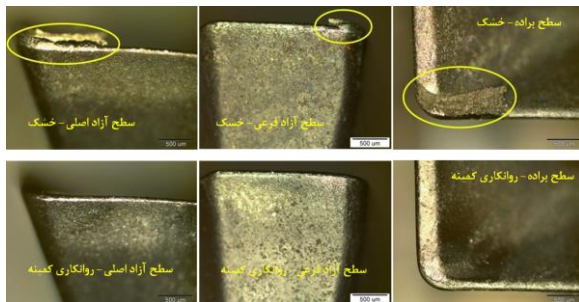
با مشاهده شکل ۲، مشخص است که عموماً هر چه شرایط فرزکاری خشن‌تر شود (افزایش سرعت و عمق برشی)، تفاوت بین مقادیر زبری سطح در حالت خشک و MQL بیشتر می‌شود و مشخصاً در خشن‌ترین حالت، این اختلاف به ۴۱٪ می‌رسد. می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از روانکاری کمینه در شرایط خشن‌کاری نسبت به شرایط پرداخت‌کاری، تاثیر بیشتری روی زبری سطح دارد. فرایند MQL توانسته است زبری سطح را برای تمام پارامترهای فرزکاری طراحی شده، از ۱۷٪ تا ۴۱٪ نسبت به حالات متناظر خشک، بهبود بخشد.



شکل ۲) نمودار زبری سطح بر اساس عمق برش، حالت روانکاری و سرعت برشی



شکل ۳) سایش سطوح ابزار (عمق ۱/۵ میلیمتر و سرعت اسپیندل ۳۰۰۰ دور بر دقیقه)

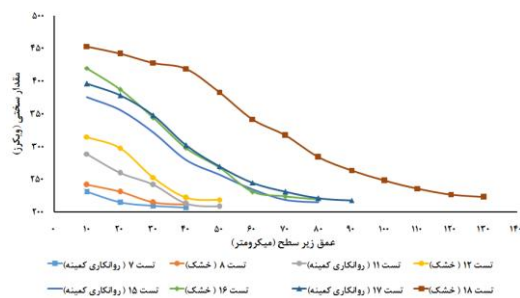


شکل ۴) سایش سطوح ابزار (عمق ۱ میلیمتر و سرعت اسپیندل ۴۰۰۰ دور بر دقیقه)

جدول ۳) نمونه‌های منتخب برای آزمون ریزسختی‌سنجی

سری	شماره تست	عمق برش (میلیمتر)	دور اسپیندل (دور بر دقیقه)
۱	۸، ۷	۱	۳۰۰۰
۲	۱۲، ۱۱	۲	۳۰۰۰
۳	۱۶، ۱۵	۱/۵	۴۰۰۰
۴	۱۸، ۱۷	۲	۴۰۰۰

ریزسختی‌سنجی در سطح مقطع جانبی نمونه‌های فرزکاری شده با فواصل ۱۰ میکرومتری از سطح تا عمق نمونه ماشینکاری شده انجام شد تا جایی که ۳ مقدار سختی متوالی اعداد تقریباً برابری (اختلاف کمتر از ۵٪) شوند. با این کار می‌توان عمق ناحیه سخت شده در هر تست ماشینکاری را نیز مشخص کرد. سختی نمونه خام (ماشینکاری نشده) 304L استفاده شده در این تحقیق، برابر با ۱۹۰ ویکرز می‌باشد. در شکل ۵ نمودارهای ریزسختی مربوط به ۸ نمونه ماشینکاری شده تحت پارامترهای برشی مشخص شده در جدول ۳، ارائه شده‌اند.



شکل ۵) نمودار ریزسختی برای نمونه‌های ماشینکاری شده

۲-۳- سایش ابزار

در این بخش برای بررسی سایش سطح آزاد و براده ابزار، به عنوان نمونه، ۲ سری از ۹ سری اینسرت‌های برشی تحت حالات فرزکاری خشک و MQL بررسی شده‌اند. بزرگنمایی میکروسکوپ نوری برای تصویربرداری، ۵۰ برابر بوده است.

۳-۲-۱- سایش ابزار (عمق ۱/۵ میلیمتر و سرعت اسپیندل ۳۰۰۰ دور بر دقیقه)

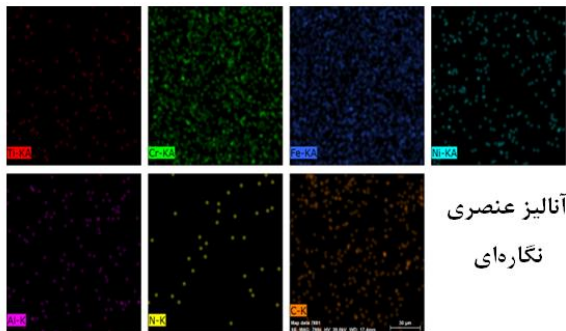
همانطور که در شکل ۳ مشخص است، بر روی سطح براده و آزاد فرعی در حالت خشک، سایش شدید لبه برنده ابزار رخ داده است که دلیل آن، حرارت زیاد روی سطح براده در حالت خشک می‌باشد و همچنین پدیده لبه انباشته البته به صورت بسیار محدود مشاهده می‌شود. لبه انباشته توسط ماده قطعه در حال ماشینکاری و چسبیدن ماده به لبه برشی ابزار اتفاق می‌افتد. ماده همانند فرآیند جوشکاری فشاری به سطح ابزار می‌چسبد. میزان گستردگی لبه انباشته روی ابزار، ارتباط مستقیم با حرارت در موضع ماشین‌کاری دارد [18]. با انباشته شدن مواد روی هم و بزرگ شدن لبه انباشته، وقتی تنش وارد به آن از تنش تسلیم ماده فراتر رود، لبه انباشته کنده می‌شود. به هنگام کنده شدن لبه انباشته، امکان ترک خوردن ابزار یا شکستگی نوک ابزار و یا چسبیدن لبه انباشته به سطح ماشین‌کاری وجود دارد [19].

۳-۲-۲- سایش ابزار (عمق ۱ میلیمتر و سرعت اسپیندل ۴۰۰۰ دور بر دقیقه)

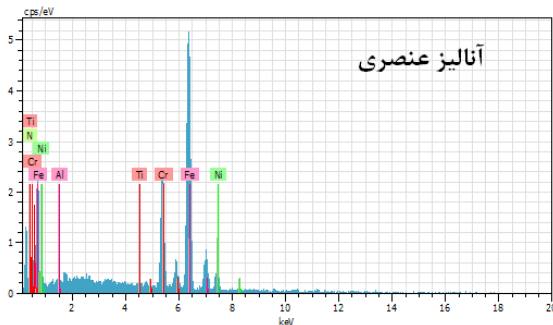
با مقایسه تصاویر سطح براده در شکل ۴، سایش بیش از حد سطح براده در حالت خشک مشخص است که همچنین روی لبه برنده اصلی نیز اثر می‌گذارد. دلیل آن نیز حرارت زیاد روی سطح براده می‌باشد که به دلیل نبود روانکار در حالت خشک است و همچنین پدیده لبه انباشته قابل ملاحظه است که در مقایسه با حالت قبلی لبه انباشته دارای حجم بیشتری است. در تصاویر مشخص است که پدیده لبه انباشته در حالت خشک اتفاق افتاده است و هنگام استفاده از روان‌کار، این ایراد روی ابزار به وجود نیامده است که دلیل آن نیز کم شدن اصطکاک میان ابزار و قطعه کار به دلیل وجود روان‌کار و همچنین کمتر شدن حرارت ناشی از پاشش آئروسول جت هوا حامل ذرات ریز روغن به موضع ماشین‌کاری است [9].

۳-۳- تغییرات ریزسختی

جهت بررسی ریزسختی به روش ویکرز پس از فرزکاری، در نظر گرفته شد تا ریزسختی‌سنجی برای چهار سری تست ماشینکاری مشخص شده در جدول ۳ انجام شود.



آنالیز عنصری
نگاره‌ای



آنالیز عنصری

شکل ۶) آنالیز عنصری روی سطح ماشینکاری شده تست ۱۷ (MQL) - (عمق ۲ میلی‌متر و سرعت اسپیندل ۴۰۰۰ دور بر دقیقه)

روی لایه‌های سطحی هستند. کارسختی صورت گرفته روی سطح ماشینکاری باعث تغییرات در شکل و اندازه دانه‌های ریزساختاری در لایه‌های زیرین می‌شود و این تغییرات تا ناحیه متاثر از این تنشهای حرارتی و مکانیکی ادامه می‌یابد [13,14,22].

۳-۴- آنالیز عنصری (EDAX) روی سطح ماشینکاری شده

نحوه کار آنالیز عنصری نگاره‌ای (EDAX Map) به این صورت است که با استفاده از اشعه بازتاب شده در اثر بمباران الکترونی یک موضع سطحی، می‌توان عناصر شیمیایی تشکیل‌دهنده آن نقطه را شناسایی کرد. تفاوت آزمون عنصری نگاره‌ای با آزمون آنالیز عنصری در این است که آزمون عنصری نگاره‌ای با استفاده از اسکن اشعه الکترونی، مکان حضور هر یک از عناصر و تجمع آنها را همانند یک نقشه مشخص می‌کند و لذا به این آزمون، عنصری نگاره‌ای گفته می‌شود.

برای مقایسه عناصر شیمیایی تشکیل‌دهنده روی یک موضع معین و مشابه از سطح شیارهای فرزکاری شده، خشن‌ترین حالت ماشینکاری (سری تست ۱۷ و ۱۸) ارزیابی شده است.

نتایج آنالیز عنصری نگاره‌ای و عنصری روی سطح ماشینکاری شده تست شماره ۱۷ (حالت روانکاری کمینه) در شکل ۶ ارائه شده است. همانطور که در آنالیز عنصری نگاره‌ای شکل ۶ مشخص است، پراکندگی یکنواختی از عناصر شیمیایی آهن، کروم، نیکل، آلومینیوم، نیتروژن، کربن و تیتانیوم روی سطح ماشینکاری وجود دارد و هیچ کدام از عناصر در قسمت خاصی دچار تراکم نشده‌اند.

همانطور که در شکل ۵ مشخص است در تمامی تست‌ها، سختی سطح ماشینکاری شده در حالت خشک از سختی سطح در MQL بیشتر است. فولادهای آستنیتی هنگام ماشینکاری در معرض کارسختی قرار می‌گیرند. میزان کارسختی با توجه به شرایط سطح آزاد ابزار و آستانه فرسایش ابزار و نوع سیالات برشی، تغییر می‌کند [20].

برای سری تست ۷ و ۸ (عمق ۱ میلی‌متر و دور اسپیندل ۳۰۰۰ دور بر دقیقه)، همانطور که مشخص است، مقادیر ریزسختی در تست شماره ۸ در حالت خشک بالاتر از مقادیر ریزسختی در تست شماره ۷ در MQL است. در هر دو تست در عمق ۴۰ میکرومتر، سختی نزدیک به سختی ماده خام است که نشان‌دهنده آخرین عمق سخت شده در اثر ماشینکاری می‌باشد. بیشتر بودن سختی در عمقهای مختلف در حالت خشک نسبت به MQL می‌تواند به دلیل سایش بیشتر سطح آزاد و تشدید آستانه فرسایش ابزار در حالت خشک و در نتیجه کارسختی بیشتر روی سطح ماشینکاری باشد [12].

برای سری تست ۱۱ و ۱۲ (عمق ۲ میلی‌متر و دور اسپیندل ۳۰۰۰ دور بر دقیقه)، عمق سخت شده قطعه کار نسبت به سری تست قبل بیشتر شده است و همین‌طور سختی در نزدیکترین نقطه از سطح نیز نسبت به سری تست اول بیشتر شده است.

برای سری تست ۱۵ و ۱۶ (عمق ۱/۵ میلی‌متر و دور اسپیندل ۴۰۰۰ دور بر دقیقه)، سختی سطحی بیشترین مقدار در مقایسه با تستهای سری اول و دوم می‌باشد. افزایش سرعت اسپیندل (افزایش سرعت برشی) می‌تواند باعث افزایش کرنش سختی به دلیل تغییر شکل شدید پلاستیک شود که این موضوع می‌تواند باعث افزایش سختی سطحی شود. این سختی در سرعتهای مختلف اسپیندل با توجه به شرایط ترمومکانیکی سطح ماشینکاری

می‌تواند متفاوت باشد، بدین مفهوم که در سرعت‌های پایین اسپیندل اثرات مکانیکی نقش غالب را دارند و اثرات حرارتی نقش کمی را ایفا می‌کنند. اثرات حرارتی زمانی موثر می‌شوند که دور اسپیندل بسیار بالا می‌رود [21].

سری تست ۱۷ و ۱۸ (عمق ۲ میلی‌متر و دور اسپیندل ۴۰۰۰ دور بر دقیقه)، دارای خشن‌ترین پارامترهای برشی می‌باشد. تحت این پارامترها، بیشترین مقادیر سختی و بیشترین عمق سخت شده متاثر از ماشین‌کاری هم برای حالت خشک و هم حالت MQL به دست آمده است. همانطور که در مقایسه تستهای سری چهارم با دیگر تستها نیز مشخص است، تاثیر تکنیک مقدار روانکاری کمینه با خشن‌تر شدن شرایط ماشینکاری بیشتر می‌شود.

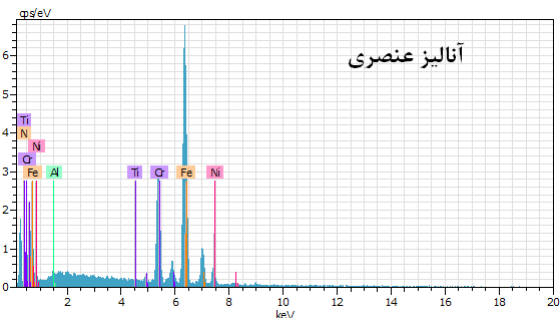
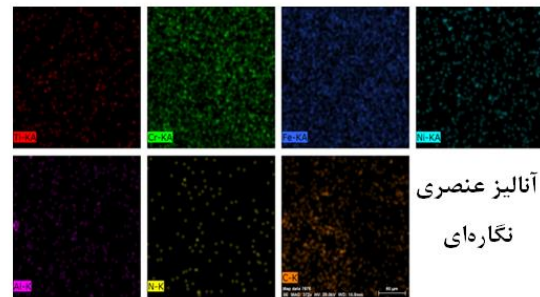
باید توجه داشت که هر چه از سطح به عمق قطعه کار پیشروی انجام شود، مقادیر سختی کاهش می‌یابند و دلیل سختی سطحی نیز تنشهای حرارتی و مکانیکی هستند که باعث افزایش کارسختی

این حالت ماشینکاری به لحاظ پارامترهای برشی، خشن‌ترین تست انجام شده در تحقیق جاری بوده است. طبیعتاً در شرایط ماشینکاری با پارامترهای برشی خفیف‌تر به خاطر دمای کمتر در موضع برش، عوامل تغییر شیمیایی سطحی نسبت به این حالت خشن (سری تست شماره ۱۷ و ۱۸) ضعیف‌تر هستند. عدم تغییر محسوس نوع، غلظت و شدت توزیع عناصر شیمیایی روی سطوح ماشینکاری شده در حالت‌های خشک و MQL، بیانگر آن است که در این شرایط ماشینکاری، علیرغم مقادیر زیاد پارامترهای برشی، افزایش دما در موضع برش، در حد تاثیرگذار و تغییردهنده ترکیب متالورژیکی و شیمیایی روی سطوح ماشینکاری شده، نبوده است.

۳-۵- تغییرات ریزساختاری

در هنگام ماشینکاری، قطعه کار تحت تأثیر انرژی مکانیکی و حرارتی قرار می‌گیرد که می‌تواند منجر به پیرسازی کرنشی (Strain Aging) و تبلور مجدد (Recrystallization) ماده شود. به علت پیرسازی کرنشی، ماده سخت‌تر می‌شود و انعطاف پذیری کمتری خواهد داشت و تبلور مجدد، منجر به افزایش چقرمگی ماده و کاهش سختی آن می‌شود. وجود همین اثرات حرارتی و مکانیکی، موجب تغییر ریزساختار، تغییر فاز و تغییر شکل پلاستیک در ماده می‌شوند [23]. عموماً بعد از ماشینکاری، سطح قطعه کار نسبت به مغز آن، رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد. تغییرات ریزساختار به واسطه فرآیندهای ترمومکانیکی در داخل قطعه، تغییر فاز و یا چسبیدن براده‌ها به سطح، موجب می‌شود که سطح قطعه ویژگی‌های متفاوتی از خود نشان دهد. این ویژگی‌ها موجب می‌شود که عموماً سطح قطعه سخت‌تر از قسمت داخلی قطعه باشد [24,25]. در این بخش، برای آماده‌سازی نمونه‌های فرزکاری شده جهت متالوگرافی، مراحل طی شد که شامل مقطع زدن، مانیت کردن (Mounting)، سمباده زدن، پولیش کردن و اچ کردن (Etching) بود. نهایتاً نمونه‌هایی از سطح مقطع جانبی شیارهای فرزکاری شده، آماده تصویربرداری شد. تصویربرداری توسط میکروسکوپ نوری و با بزرگنمایی‌های مختلف انجام شد. در این تست‌ها برای اچ کردن مقطع جانبی سطوح فرزکاری شده 304L، از محلول اچ ماربل (Marble's Reagent) استفاده شده است که مواد تشکیل دهنده آن عبارت از ۲ گرم سولفات مس (CuSO₄)، ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر و ۱۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک (Hydrochloric Acid) هستند. زمان اچ هر نمونه ۱۵ ثانیه بوده است.

در شکل ۸ علاوه بر تصاویر ریزساختاری ماده خام (Bulk) نمونه ماشینکاری نشده با بزرگنمایی‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ برابر، تصاویر ریزساختاری در مقاطع عرضی (جانبی) مربوط به ۴ نمونه ماشینکاری شده خشک و MQL تحت پارامترهای برشی مختلف با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر ارائه شده‌اند، این ۴ نمونه همان نمونه‌های ۷، ۸، ۱۷ و ۱۸ سختی‌سنجی شده در بخش ریزسختی هستند. روی



شکل ۷) آنالیز عنصری روی سطح ماشینکاری شده تست ۱۸ (خشک) - (عمق ۲ میلی‌متر و سرعت اسپیندل ۴۰۰۰ دور بر دقیقه)

طبق انتظار درصد حضور عنصر آهن (Fe) با رنگ آبی و عنصر کروم (Cr) با رنگ سبز در آنالیز عنصری نگاره‌ای بسیار بیشتر از دیگر عناصر می‌باشد. دلیل این موضوع هم این است که اصولاً ماده فولاد ضدزنگ آستنیتی ۳۰۴، دارای ۶۶ الی ۷۴ درصد وزنی آهن و ۱۸ الی ۲۰ درصد وزنی عنصر کروم است [1].

نتایج آنالیز عنصری نگاره‌ای و عنصری روی سطح ماشینکاری شده تست شماره ۱۸ (حالت خشک) در شکل ۷ ارائه شده است. در آنالیز عنصری نگاره‌ای شکل ۷ نیز پراکندگی یکنواختی از عناصر شیمیایی آهن، کروم، نیکل، آلومینیوم، نیتروژن، کربن و تیتانیوم روی سطح ماشینکاری وجود دارد که نشان‌دهنده این است که استفاده از فرآیند MQL نسبت به خشک باعث ایجاد تغییرات خاص و ملموس در تغییر ترکیبات و عناصر شیمیایی موجود روی سطوح ماشینکاری شده نمی‌شود و هر دو دارای الگوی عناصر و ترکیبات شیمیایی سطحی مشابهی می‌باشند.

با مقایسه نمودارهای آنالیز عنصری برای سطوح ماشینکاری خشک و MQL ارائه شده در شکل‌های ۶ و ۷ به وضوح این مطلب قابل مشاهده است که اولاً پیکهای (قله‌های) معرف هر عنصر شیمیایی و ثانیاً شدت و تعداد این پیکها برای هر عنصر که بیانگر درصد وزنی نرمال توزیع شده آن عنصر روی سطوح ماشینکاری شده است، مشابه و متناظر یکدیگر هستند و تقریباً هیچ تفاوت معناداری بین این دو نمودار آنالیز عنصری ۶ و ۷ مشاهده نمی‌شود. در نتیجه به واسطه این دو فرآیند فرزکاری تحت حالات خشک و روانکاری کمینه، عملاً هیچ‌نوع تغییر عناصر و ترکیبات شیمیایی در سطح ماشینکاری شده رخ نداده است، علیرغم اینکه

MQL است، پس اثرات آن نیز که از بین رفتن مرزدانه‌ها می‌باشد، با توجه به تصاویر ۸ نیز شدیدتر می‌باشد و به عبارتی لهیدگی بیشتری بر روی دانه‌ها در حالت خشک اتفاق افتاده است. نزدیک-تر شدن به سطح ماشینکاری، منجر به افزایش تنش‌های مکانیکی و حرارتی و به دنبالش تغییر فرم و عدم تمایز مرزدانه‌ها شده است. این امر همان‌طور که در نمودارهای سختی‌سنجی شکل ۵ دیده شد، منجر به سختی بیشتر سطح قطعه کار نسبت به عمق قطعه کار و کاهش تدریجی مقادیر ریزسختی از سطح تا عمق هر نمونه ماشینکاری، شده بود. با توجه به نمودارهای سختی‌سنجی در شکل ۵ و همچنین تصاویر ریزساختاری ۸ برای هر ۴ نمونه ماشینکاری شده، دیده می‌شود که بین عمق ناحیه سخت شده برای هر نمونه و ضخامت لایه تغییر شکل یافته پلاستیک در تصویر ریزساختاری متناظرش، یک رابطه مستقیم وجود دارد.

۴- نتیجه‌گیری

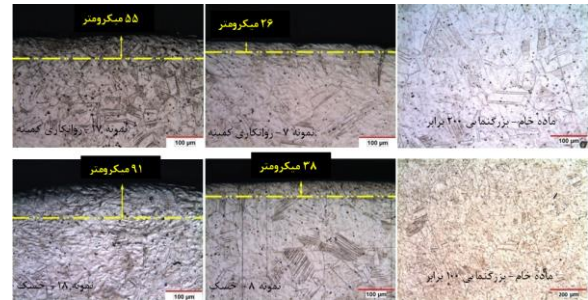
۱) فرآیند MQL توانسته زبری سطح را، از ۱۷٪ تا ۴۱٪ نسبت به حالات متناظر ماشینکاری خشک، بهبود دهد. هرچه شرایط فرزکاری خشن‌تر می‌شود، تفاوت بین زبری سطح در حالت خشک و MQL بیشتر می‌شود، لذا استفاده از MQL در شرایط خشن‌کاری نسبت به پرداخت‌کاری، تأثیر بیشتری روی زبری سطح دارد.

۲) تحت فرزکاری خشک عمدتاً ایراد براده با لبه انباشته روی سطح براده ابزار وجود داشت که با افزایش سرعت برشی، از حجم براده با لبه انباشته کاسته شد. در حالت خشک، عیوبی نظیر لبه انباشته، ساییش شدید سطح آزاد و لب‌پر شدگی ابزار ایجاد شد. در فرزکاری MQL این عیوب کاهش چشمگیری داشتند.

۳) سختی سطح فرزکاری شده در حالت خشک از MQL بیشتر است. با افزایش سرعت و عمق برشی، سختی سطحی افزایش یافته است. تحت شدیدترین پارامترهای برشی، بیشترین مقادیر سختی و عمق سخت‌شده، هم برای حالت خشک و هم MQL به دست آمده است. به طور کلی، MQL نسبت به حالت خشک، باعث کمتر شدن مقادیر سختی و عمق سخت‌شده زیر سطح ماشینکاری می‌شود.

۴) با آنالیز عنصری EDAX مشخص شد که تحت حالات فرزکاری خشک و MQL عملاً هیچ‌نوع تغییر عناصر و ترکیبات شیمیایی در سطح ماشینکاری رخ نداده است. لذا علیرغم مقادیر زیاد پارامترهای برشی، افزایش دما در موضع برش، در حد تغییر دهنده ترکیب متالورژیکی و شیمیایی روی سطوح ماشینکاری، نبوده است.

۵) فرزکاری خشک نسبت به حالت متناظر MQL و همچنین افزایش پارامترهای برشی، سبب افزایش ضخامت لایه تغییر شکل یافته پلاستیک شده است. حداکثر درصد کاهش ضخامت لایه



شکل ۸) تصاویر ریزساختاری مقطع عرضی نمونه‌های ماشینکاری شده تحت شرایط مختلف (بزرگنمایی ۲۰۰ برابر)

تصاویر ریزساختاری هر نمونه ماشینکاری، ضخامت متوسط لایه سطحی تغییر شکل یافته پلاستیک با استفاده از خط‌چین زرد رنگ مشخص شده است و ضخامت متوسط این ناحیه تغییر شکل یافته نیز بر حسب مقیاس مندرج در حاشیه تصاویر میکروسکوپی، تخمین و در بالای تصاویر درج شده است.

تغییرات ریزساختاری تحت پارامترهای مختلف برشی و حالات خشک و MQL در شکل ۸ نشان داده شده است. علت تغییر شکل پلاستیک شدید و دانه‌های ریزساختاری فشرده شده در هم، در لایه‌های زیرین سطح ماشینکاری، وقوع کارسختی و کرنش سختی می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود ضخامت لایه‌ای که تحت تأثیر تغییر شکل پلاستیک و کرنش سختی قرار گرفته در تمام نمونه‌های بررسی شده، در حالت خشک به دلیل فشار مکانیکی بیشتر ابزار بر روی سطح قطعه کار، بیشتر از حالت MQL است.

پارامترهای برشی نمونه‌های ۷ و ۸: (عمق ۱ میلی‌متر و سرعت اسپیندل ۳۰۰۰ دور بر دقیقه)

پارامترهای برشی نمونه‌های ۱۷ و ۱۸: (عمق ۲ میلی‌متر و سرعت اسپیندل ۴۰۰۰ دور بر دقیقه)

با توجه به ضخامت نواحی تقریبی تغییر شکل یافته پلاستیک سطحی مندرج در تصاویر ریزساختاری ۸ می‌توان دید که حداکثر درصد کاهش ضخامت لایه تغییر شکل یافته در فرزکاری MQL نسبت به حالت متناظر خشک حدود ۳۹٪ است. همچنین با مقایسه تصاویر مربوط به دو سری پارامترهای برشی مندرج در شکل ۸ می‌توان دید که ضخامت لایه تغییر شکل یافته پلاستیک، به طور کلی با افزایش سرعت برشی (سرعت اسپیندل) و عمق برش، افزایش می‌یابد.

با توجه به تصاویر شکل ۸، مشاهده می‌شود که عموماً در مناطق مرزی مجاور لایه کارسخت شده سطحی، اندازه متوسط و تقریبی دانه‌های ریزساختاری کمتر از نواحی مرکزی می‌باشد و تراکم مرزدانه‌ها یا به عبارتی دانسیته سطحی مرزدانه‌ها در لایه سطحی افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که در ناحیه تغییر شکل یافته سطحی، عملاً مرزدانه‌ها قابل تشخیص نیست. کارسختی که در فرزکاری خشک روی سطح ماشینکاری انجام می‌شود بیشتر از ماشینکاری

formation on a carbide cutting tool with machining aluminium alloy under dry and wet conditions.

10- Zhang S, Li JF, Wang YW. Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions. *Journal of cleaner production*. 2012 Sep 1;32:81-7.

11- Kedare SB, Borse DR, Shahane PT. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on surface roughness of mild steel of 15HRC on universal milling machine. *Procedia Materials Science*. 2014 Jan 1;6:150-3.

12- Pereira O, Rodríguez A, Fernández-Abia AI, Barreiro J, De Lacalle LL. Cryogenic and minimum quantity lubrication for an eco-efficiency turning of AISI 304. *Journal of Cleaner Production*. 2016 Dec 15;139:440-9.

13- Thakur A, Gangopadhyay S. State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2016 Jan 1;100:25-54.

14- Hongmin X, Yaoyao S. Surface morphology and affected layer in disc-milling grooving of titanium alloy. *Rare Metal Materials and Engineering*. 2016 Dec 1;45(12):3050-6.

15- Azami A, Salahshournejad Z, Shakouri E, Sharifi AR, Saraeian P. Influence of nano-minimum quantity lubrication with MoS₂ and CuO nanoparticles on cutting forces and surface roughness during grinding of AISI D2 steel. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023 Feb 3;87:209-20.

16- Emami M. Study of the performance of minimum quantity lubrication (MQL) and type of lubricant in the milling process of stainless steel EN1. 4903. (In Persian).

17- Zhao W, He N, Li L. High speed milling of Ti6Al4V alloy with minimal quantity lubrication. *Key engineering materials*. 2007 Jan 16;329:663-8.

18- Saketi S, Olsson M. Influence of CVD and PVD coating micro topography on the initial material transfer of 316L stainless steel in sliding contacts-A laboratory study. *Wear*. 2017 Oct 15;388:29-38.

19- Andersson A. Built-up edge formation in stainless steel milling.

20- Ulutan D, Ozel T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2011 Mar 1;51(3):250-80.

21- Huang W, Zhao J, Niu J, Wang G, Cheng R. Comparison in surface integrity and fatigue performance for hardened steel ball-end milled with different milling speeds. *Procedia Cirp*. 2018 Jan 1;71:267-71.

22- Bordin A, Bruschi S, Ghiotti A. The effect of cutting speed and feed rate on the surface integrity in dry turning of CoCrMo alloy. *Procedia Cirp*. 2014 Jan 1;13:219-24.

23- Yang X, Richard Liu C. Machining titanium and its alloys. *Machining science and technology*. 1999 Jan 1;3(1):107-39.

24- Jabbaripour B, Masouleh HS, Salmasi MH. Comparison of surface integrity, tool wear and chip

تغییر شکل یافته در فرزکاری MQL نسبت به فرزکاری متناظر خشک حدود ۳۹٪ بوده است.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده و همچنین برای چاپ، به نشریه دیگری نیز فرستاده نشده است.

تعارض منافع: مقاله حاضر، هیچگونه تعارض منافی با سازمانها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: آریا تاج‌الدین (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ امیرحسین رنجبر (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ بهزاد جباری‌پور (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی/روش‌شناس/تحلیل‌گر داده‌ها (۳۰٪).

منابع مالی: توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.

منابع

- 1- Kaviani nezhad F. Stainless and heat resistance steels. Abgin Rayan publication. 2007; 19-50 (In Persian).
- 2- Endrino JL, Fox-Rabinovich GS, Gey C. Hard AlTiN, AlCrN PVD coatings for machining of austenitic stainless steel. *Surface and Coatings Technology*. 2006 Aug 1;200(24):6840-5.
- 3- Maruda RW, Krolczyk GM, Feldshtein E, Pusavec F, Szydowski M, Legutko S, Sobczak-Kupiec A. A study on droplets sizes, their distribution and heat exchange for minimum quantity cooling lubrication (MQCL). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2016 Jan 1;100:81-92.
- 4- Jabbaripour B, Sadeghi MH, Shabgard MR, Faraji H. Investigating surface roughness, material removal rate and corrosion resistance in PMEDM of γ -TiAl intermetallic. *Journal of Manufacturing Processes*. 2013 Jan 1;15(1):56-68.
- 5- Jabbaripour B, Sadeghi MH, Shabgard MR, Faraji H. Investigating Output Characteristics in Powder Mixed Electrical Discharge Machining of γ -TiAl Intermetallic. (in Persian).
- 6- Ramezani NM, Rasti A, Sadeghi MH, Pour BJ, Hajideh MR. Experimental study of tool wear and surface roughness on high speed helical milling in D2 steel. *Modares Mech Eng*. 2016;15(20):198-202. (in Persian).
- 7- Jabbaripour B, Sadeghi MH, Shabgard MR, Shajari S, Hassanpour H. Investigating the effects of powder mixed electrical discharge machining on the surface quality of γ -TiAl intermetallic. *Advanced Materials Research*. 2012 Apr 10;488:396-401.
- 8- Ansari MJ, Jabbaripour B. Manufacture and comparison of mechanical properties of reinforced polypropylene nanocomposite with carbon fibers and calcium carbonate nanoparticles. (in Persian).
- 9- Azlan UA, Hadzley M, Tamin NF, Noor FM, Azhar AA, Yusoff MR, Noriman NZ. Observation of built-up edge

morphology in CO₂ cryogenic and dry milling of 304 stainless steel. *Surface Topography: Metrology and Properties*. 2021 Mar 26;9(1):015032.

25- Dinarvand S, Jabbaripour B. Comparison of Machined Surface Integrity in 304L Stainless Steel Turning under Minimum Quantity Lubrication (MQL) and Cryogenic (CO₂) Conditions. *Modares Mechanical Engineering*. 2023 Nov 10;23(11):577-85. (In Persian).